Actualización de Bases de Conocimiento en el contexto de Horn como Lenguaje de Representación

Carlos Daniel Luna[§] **y Marcelo Falappa**
e-mail: cluna@exa.unrc.edu.ar, ccfalapp@criba.edu.ar
Área de Computación - Universidad Nacional de Río Cuarto
Departamento de Ciencias de la Computación - Universidad Nacional del Sur

Palabras clave: Lógica, Programación en Lógica, Inteligencia Artificial, Teoría de Cambio de Creencias, Bases de Conocimiento.

Resumen

Dentro del campo de la Inteligencia Artificial, existen diferentes áreas que tratan de modelar el razonamiento humano. En particular, la Teoría de Cambio de Creencias busca caracterizar la dinámica del conocimiento, esto es, como debería ser la actitud epistémica de un agente racional frente a ciertas creencias ante la llegada de nueva información. Esta información externa puede implicar la incorporación o el abandono de ciertas creencias –mediante ciertas operaciones de cambio– generando de este modo un nuevo estado epistémico.

Este trabajo presenta un análisis de la aplicación del modelo AGM (Alchourrón, Gärdenfors y Makinson) de cambio de creencias sobre Bases de Conocimiento finitas, a partir de la utilización de cláusulas Horn como lenguaje de representación (inicial) y resolución-SLD como mecanismo de prueba. Distintas funciones de expansión y contracción son expuestas, y modelos alternativos son considerados con el objetivo de satisfacer, por un lado, la claridad y declaratividad de una base actualizada, y por el otro, garantizar la mínima pérdida de información en un cambio epistémico y la composicionalidad de las operaciones de cambio. Se analizan los problemas suscitados en la satisfacción de ciertos postulados AGM y las soluciones propuestas, junto con determinadas propiedades adicionales que se verifican para un sistema particular de actualización formulado (en base al lenguaje elegido). Este sistema se caracteriza por incluir excepciones en el conjunto de las creencias derivadas y por satisfacer un criterio diferente del concepto de máxima conservación del conocimiento luego de un cambio, que el considerado por AGM.

Asimismo, las limitaciones de Horn como lenguaje de representación de conocimiento son establecidas y una extensión propia es propuesta, a la vez que los sistemas de cambio de creencias previamente formulados son analizados para el nuevo contexto.

1. Introducción

Dentro del campo de la Inteligencia Artificial, existen diferentes áreas que tratan de modelar el razonamiento humano. Para ello es necesario determinar un lenguaje en el cual se representará el conocimiento de un agente y definir reglas, que en base a tal conocimiento, puedan derivar nuevas conclusiones. La mayoría de estos sistemas parten de un lenguaje de primer orden (o un subconjunto del mismo) y realizan una extensión de forma tal que puedan tratar con información potencialmente inconsistente. El objetivo de estos sistemas es poder obtener nuevas conclusiones a partir de una base de conocimiento fija, imperturbable en el tiempo. Esto significa que tales sistemas se basan en la hipótesis de que el conocimiento básico de un agente no puede ser modificado [FAL95a].

Sin embargo, existen otras áreas cuyo objetivo es caracterizar la dinámica del conocimiento [AGM85] [GÄR88a] [GÄR88b] [HAN93a] [HAN95], esto es, como un agente racional actualiza su estado epistémico al recibir nueva información. Una de estas áreas se conoce como *Teoría de Cambio de Creencias*, la cuál mediante ciertas operaciones de cambio, permite caracterizar la actitud epistémica de un agente después de incorporar nuevas creencias, o de rechazar parcial o totalmente el conocimiento disponible por él, en base a información externa recibida. La Teoría de Cambio de Creencias irrumpe en la lógica filosófica y la inteligencia artificial en la última década.

[§] Deseo agradecer al Dr. Guillermo Simari por haberme incentivado y apoyado en el desarrollo de este trabajo. Asimismo, a Eduardo Fermé por el material y la bibliografía sugerida.

El paso inicial fue provisto por Levi [LEV80] y Alchourrón, Gärdenfors y Makinson en [AGM85] (comúnmente llamado el modelo AGM). Posteriormente, numerosos trabajos se han desarrollado en esta área y en torno a este modelo.

Este trabajo presenta un análisis de la aplicación del modelo AGM (Alchourrón, Gärdenfors y Makinson) de cambio de creencias a Bases de Conocimiento finitas, a partir de la utilización de cláusulas Horn como lenguaje de representación (inicial) y resolución-SLD como mecanismo de prueba. Trabajar con BC's nos permitirá distinguir entre las creencias básicas y derivadas de un agente, como así también hablar de implementaciones computacionales con costos razonables.

El modelo AGM será descripto en la sección 2, en la 3 introducimos las Bases de Conocimiento para presentar en la sección 4, el análisis para el lenguaje Horn. Posteriormente formulamos una extensión del lenguaje de representación de conocimiento en la sección 5, junto con un estudio de la aplicación de las operaciones y los sistemas de cambio –previamente introducidos en 4– al nuevo contexto. Finalmente, exponemos nuestras conclusiones en la sección 6.

1.1 Un Ejemplo[1]

Supongamos tener una base de conocimiento (BC) que contiene, entre otras cosas, las siguientes piezas de información (en alguna forma de código): (α) ***Los metales se dilatan al calentarse*** y (β) ***Los metales son sólidos a temperatura ordinaria***. Asumamos que luego descubrimos, de alguna manera, que el mercurio es un metal. Al incorporar nuestra nueva creencia (γ: ***El mercurio es un metal***) a la BC no se produce ninguna contradicción entre las creencias –suponemos contar con un mecanismo que puede computar inferencias lógicas en el código dado. Hemos *expandido*, así, nuestro conocimiento y la BC contiene, ahora también, la creencia γ. Entonces, mediante el mecanismo de inferencia disponible, las siguientes sentencias pueden ser derivadas de α, β y γ: (ε) ***El mercurio se dilata al calentarse*** y (φ) ***El mercurio es sólido a temperatura ordinaria***.

Ahora, supongamos que descubrimos, de alguna manera, que el mercurio no es sólido a temperatura ordinaria. Luego, si queremos incorporar el hecho $\neg\varphi$ (la negación de φ) a la BC esta se torna inconsistente; si deseamos mantener la BC consistente (sin contradicciones), que es una metodología sana, necesitamos *revisarla*. Esto significa que al menos algunas de las creencias en la BC original deben ser abandonadas. Podemos ver que no es necesario eliminar todas las creencias de la BC para asegurar la consistencia, esto sería una pérdida innecesaria de información valiosa. En este ejemplo alcanza con elegir entre eliminar: β o γ. El problema de la revisión de creencias es que no hay consideraciones puramente lógicas que nos ayuden a decidir cual o cuales sentencias deben ser retraídas. El tema se complica debido a que las creencias en la BC tienen consecuencias; así, cuando eliminamos una creencia decidimos cuales consecuencias conservar y cuales no. Por ejemplo, si decidimos eliminar γ en la situación descripta, γ tiene como consecuencias lógicas: ε y φ. Si bien queremos prescindir de φ, ¿Queremos mantener la sentencia ε en la BC revisada?. Si decidimos eliminar β, la situación es análoga. La sentencia β tiene como consecuencia, en la situación descripta: (β\`) ***Los metales, excepto el mercurio, son sólidos a temperatura ordinaria***.

Si en nuestra BC tuviésemos, además, la sentencia (ξ) ***La cantidad de elementos químicos es constante***, pero luego de un tiempo descubrimos que la fuente de información de ξ no es confiable (la información ξ es posiblemente errónea), desearíamos descartar ξ de nuestras creencias aceptadas. Y, como desconocemos la veracidad de ξ, ésta debería permanecer indeterminada en la BC que represente al nuevo estado de creencias. Esta clase de operación de cambio, llamada *contracción*, es distinta a la revisión –ya que no se producen inconsistencias– pero presenta problemas análogos a ésta, debido a que deberíamos eliminar también creencias que deriven ξ (para asegurar el éxito de la operación) y aquellas que se deduzcan exclusivamente en base a dicha sentencia. El proceso de revisión, al igual que el de contracción, no poseen soluciones únicas, requieren la selección de uno entre los varios resultados posibles.

---

[1] El desarrollo de este ejemplo sigue en líneas generales la estructura de un ejemplo similar planteado en [GÄR92].

Como vemos, existe una serie de problemas metodológicos y filosóficos involucrados en el proceso de cambio de creencias. Desde el punto de vista filosófico se presentan entre otras, las siguientes cuestiones: ¿Qué es hacer un cambio racional?, ¿Cómo se pueden describir los estados de creencia de un agente?. Preguntas de este estilo condujeron a Carlos Alchourrón, Peter Gärdenfors y David Makinson a adoptar un conjunto de postulados (modelo AGM) que, en su opinión, son los que corresponden al cambio de creencias (o cambio de un estado epistémico) de un agente racional [ALC80] [ALC82] [ALC85] [GÄR88a] [GÄR88b]. Existen representaciones de estos postulados en términos de funciones de expansión, contracción y revisión de teorías, así como también en términos de modelos (Grove 1986, Mendelzon 1990).

2. Modelo AGM

2.1 Conjuntos de Creencias

Los conjuntos de creencias (las teorías lógicas) son conjuntos lógicamente cerrados de sentencias en una lógica dada. Esto es,

<u>*Definición*</u> **(Conjunto de Creencias)**: Un conjunto de sentencias K es un *conjunto de creencias* (*una teoría lógica*) si y solamente si: *Si* $K \vdash \alpha$*, entonces* $\alpha \in K$, es decir, K = *Cn*(K) $\subseteq$ **L**.

Cn es un operador de consecuencia lógica sobre un lenguaje **L**, que satisface las siguientes propiedades: A $\subseteq$ *Cn*(A); Si A $\subseteq$ B, entonces *Cn*(A) $\subseteq$ *Cn*(B) y *Cn*(A) = *Cn*(*Cn*(A)) –para todo par de conjuntos de proposiciones A y B. Además, asumimos que *Cn* cumple las propiedades de *compacidad, supraclasicidad y deducción* [GÄR88a].

En lo que sigue K denotará un conjunto de creencias. $K \vdash \alpha$ es un alternativa notación para $\alpha \in$ *Cn*(K). $K_\perp$ representa al conjunto inconsistente[2], formado por todas las sentencias en el lenguaje **L** y, *Cn*($\emptyset$) es el conjunto de creencias más pequeño, compuesto únicamente de las sentencias lógicamente válidas de **L**.

2.2 AGM: Una Teoría Epistemológica basada en Conjuntos de Creencias

Una Teoría Epistemológica provee un marco conceptual para modelar el dinamismo de las creencias y el conocimiento de un agente. A fin de lograr esto, una teoría provee también el modo para representar los elementos epistémicos y un conjunto de criterios de racionalidad para comprender los dinamismos (cambios) epistémicos [GÄR88a].

Los conjuntos de creencias o teorías lógicas son conjuntos de sentencias que pueden ser soportadas racionalmente por un individuo. El modelo AGM define una teoría epistemológica en base a conjuntos de creencias, como sigue:

<u>Estados epistémicos</u> (estados de ceencias): Representados por *Conjuntos de Creencias* respecto de un lenguaje **L**. Llamaremos $\Sigma_K = \{K \mid K$ es un conjunto de creencias basado en **L**$\}$.

<u>Actitudes epistémicas</u>: Para cada sentencia α del lenguaje, en cada estado epistémico K, puede ser: *aceptada* (si el agente cree en α, *i.e.* $\alpha \in$ K), *rechazada* (cuando el agente acepta $\neg\alpha$, *i.e.* $\neg\alpha \in$ K) o *indeterminada* (cuando un agente no tiene información acerca de α, es decir, ni acepta α ni la rechaza en su conocimiento K).

<u>Cambios de creencia</u>: El modelo provee tres operaciones de cambio: la *expansión* (+), la *contracción* (–) y la *revisión* ($*$) de teorías. Éstas se modelan mediante relaciones funcionales que toman un conjunto de creencias (estado epistémico) de Σ_K, una sentencia (creencia) de **L**, y devuelven un nuevo conjunto de creencias (nuevo estado epistémico) de Σ_K. Supongamos la entrada α en un estado epistémico K.

<u>Entradas epistémicas</u>: Son aquellas dictadas por la experiencia y se consideran “fuerzas o razones externas”.

<u>Criterios de racionalidad</u>: A los inherentes a conjuntos de creencias se agrega el criterio de “*Economía de la Información*”. Este criterio consiste básicamente en retener la mayor cantidad de información posible cuando se produce un cambio de creencias. Un criterio implícitamente

[2] Una teoría K es consistente si no existe una sentencia α del lenguaje tal que α y $\neg\alpha$ sean elementos de K.

establecido por el modelo AGM indica que toda nueva información que provoca un cambio de creencias (entrada epistémica), debe ser incorporada al estado epistémico del agente. Además, el estado de creencias de un agente, luego de un cambio, debe ser consistente siempre que esto sea factible[3]. Este último punto asegura que las sentencias aceptadas por un individuo comparten algún sentido de coherencia.

2.3 Operaciones de Cambio: Postulados

Si K es un conjunto de creencias consistente, entonces las expansiones transforman creencias que eran indeterminadas en aceptadas o rechazadas, las contracciones transforman creencias que eran aceptadas o rechazadas en indeterminadas, mientras que las revisiones transforman creencias aceptadas en rechazadas y viceversa. A continuación presentamos los postulados propuestos por el modelo AGM.

2.3.1 Expansión

La expansión de creencias se deriva de 'aprender algo', la causa más común de tales cambios son observaciones provistas por otros agentes. La expansión de K por ϕ se denota $K^+\phi$.

(K^+1)	Si K es un conjunto de creencias, $K^+\phi$ es un conjunto de creencias
(K^+2)	$\phi \in K^+\phi$
(K^+3)	$K \subseteq K^+\phi$
(K^+4)	Si $\phi \in K$, entonces $K^+\phi = K$
(K^+5)	Si $K_1 \subseteq K_2$, entonces $K_1{}^+\phi \subseteq K_2{}^+\phi$
(K^+6)	Para todo conjunto K y para toda sentencia ϕ, $K^+\phi$ es el menor conjunto de creencias que satisface (K^+1)-(K^+5)

El teorema que sigue provee una explícita definición para el proceso de expansión en términos puramente lógicos y de la teoría de conjuntos.

Teorema: Una función de expansión satisface (K^+1)-(K^+6) sssi $K^+\phi = Cn(K \cup \{\phi\})$.

2.3.2 Revisión

El siguiente tipo de cambio de creencias ocurre cuando una sentencia ϕ, que representa una entrada epistémica para el conjunto K, contradice las creencias ya existentes en K (si bien, en la práctica puede que ϕ no sea inconsistente con K, la motivación intuitiva es para el caso mencionado). Este tipo de cambio es "no monótono"; nuevas creencias se agregan, pero no todas las anteriores se conservan. Los postulados que se verán a continuación, si bien no determinan de manera única la función de revisión, enmarcan las posibles soluciones a los criterios de racionalidad de AGM. $K*\phi$ denota la revisión de K por ϕ.

(K^*1)	Si K es un conjunto de creencias, $K^*\phi$ es un conjunto de creencias.
(K^*2)	$\phi \in K^*\phi$
(K^*3)	$K^*\phi \subseteq K^+\phi$
(K^*4)	Si $\neg\phi \notin K$, entonces $K*\phi = K^+\phi$
(K^*5)	$K^*\phi = K_\perp$ sssi $\neg\phi \in Cn(\emptyset)$
(K^*6)	Si $\phi\leftrightarrow\psi \in Cn(\emptyset)$, entonces $K^*\phi = K^*\psi$
(K^*7)	$K^*(\phi\wedge\psi) \subseteq (K^*\phi)^+\psi$
(K^*8)	Si $\neg\psi \notin K^*\phi$, entonces $(K^*\phi)^+\psi \subseteq K^*(\phi\wedge\psi)$

(K^*1)-(K^*6) constituyen el conjunto de postulados básicos para la revisión, ya que no se refieren a revisiones con sentencias compuestas. (K^*7) y (K^*8) contemplan revisiones de sentencias compuestas (conjunciones).

---

[3] Al usar teorías lógicas y asumir un operador de consecuencia supraclásico, implícitamente establecemos que las tautologías forman parte de todo estado epistémico. Luego, debido a la determinación de incorporar toda nueva información que causa una entrada epistémica, podemos llegar a obtener $K_\perp$.

2.3.3 Contracción

Una contracción ocurre cuando una sentencia es refutada, pero ninguna sentencia es sumada. La contracción de K por una sentencia ϕ se denota $K^{-}\phi$. La contracción, al igual que la revisión, no está unívocamente definida en términos puramente lógicos y de la teoría de conjuntos, como ocurre en el caso de la expansión. Cuando realizamos la contracción de una teoría K por una creencia, algunas sentencias de K deben ser eliminadas a fin de que el sistema resultante, cerrado bajo consecuencia lógica, refleje el efecto de la actualización del conocimiento. Los siguientes postulados circunscriben el conjunto de soluciones para el caso de la contracción de teorías, siguiendo los criterios de racionalidad de AGM.

(K^{-}1)	Si K es un conjunto de creencias, $K^{-}\phi$ es un conjunto de creencias
(K^{-}2)	$K^{-}\phi \subseteq K$
(K^{-}3)	Si $\phi \notin K$, entonces $K^{-}\phi = K$
(K^{-}4)	Si $\phi \notin Cn(\emptyset)$, entonces $\phi \notin K^{-}\phi$
(K^{-}5)	$K \subseteq (K^{-}\phi)^{+}\phi$
(K^{-}6)	Si $\phi \leftrightarrow \psi \in Cn(\emptyset)$, entonces $K^{-}\phi = K^{-}\psi$
(K^{-}7)	$K^{-}\phi \cap K^{-}\psi \subseteq K^{-}(\phi \wedge \psi)$
(K^{-}8)	Si $\phi \notin K^{-}(\phi \wedge \psi)$, entonces $K^{-}(\phi \wedge \psi) \subseteq K^{-}\phi$

(K^{-}1)-(K^{-}6) son los postulados básicos para la contracción. (K^{-}7) y (K^{-}8) contemplan contracciones de sentencias compuestas (del tipo $\phi \wedge \psi$). El espíritu de (K^{-}5) es la mínima pérdida del antiguo conocimiento, es decir, garantiza que no perderemos la información esencial de nuestro antiguo conocimiento, al punto que éste puede ser recuperado en su totalidad agregando nuevamente la sentencia contraída.

2.3.4 Relación entre la Contracción y Revisión de Teorías

En las secciones previas la contracción y la revisión están dadas por dos conjuntos de postulados independientes, en el sentido de que los postulados de contracción no hacen referencia a los de revisión y viceversa. Sin embargo, es posible definir una operación en términos de la otra tal cual lo ilustran las siguientes fórmulas de Levi [LEV77] y Harper [HAR77]:

(**Levi**: *Def* $*$) $\quad K^{*}\phi = (K^{-}\neg\phi)^{+}\phi$

(**Harper**: *Def* –) $\quad K^{-}\phi = K \cap (K^{*}\neg\phi)$

De acuerdo a Levi, los únicos cambios de creencia legítimos (necesarios) son las expansiones y las contracciones, ya que una revisión puede ser establecida como una secuencia de una contracción y expansión. (**Levi**: *Def* $*$) está motivada en que el conjunto inicial debe ser preparado para "acomodar" la nueva creencia ϕ, retrayendo todas las viejas creencias que se contradicen con ella (es decir, contrayendo K por $\neg\phi$). Esta fórmula se ve reforzada por el siguiente teorema [GÄR88b]:

<u>*Teorema*</u>: Si la función de contracción '–' satisface (K^{-}1)-(K^{-}6), y la expansión satisface (K^{+}1)-(K^{+}6), entonces la función '$*$', obtenida por (Levi: *Def* $*$), satisface (K^{*}1)-(K^{*}6); Además, si '–' satisface (K^{-}7), entonces '$*$' cumple (K^{*}7); si '–' satisface (K^{-}8) entonces '$*$' también cumple (K^{*}8).

3. Bases de Conocimiento

Una base de conocimiento o base de creencias (BC) es una colección estructurada de ítems de información. Estos ítems están representados por un *conjunto finito*[4] de sentencias en un cierto lenguaje **L**, el cual cuenta con una relación de inferencia que tiene asociado un operador de consecuencia lógica. Decimos que un conjunto de sentencias K_B es una base de creencias para un conjunto de creencias (una teoría lógica) K, si y solamente si: $K = Cn(K_B)$. Entonces, una BC elimina la restricción impuesta para teorías lógicas respecto de la clausura del conjunto.

---

[4] En general, las *bases de conocimiento* se asumen que son conjuntos finitos no necesariamente clausurados. En cambio, las *bases de creencias* son conjuntos no necesariamente clausurados ni finitos.

El problema de actualizar una BC es esencial para la realización de un sistema inteligente. El origen de los problemas está en la interacción entre los hechos actualizados y los que se derivan [FAG83]. Luego, una BC y sus consecuencias pueden ser vistas como un modelo de un estado epistémico. Al igual que en el modelo AGM, cada sentencia ϕ del lenguaje **L** puede hallarse en uno de los siguientes estados, con respecto a una base de creencias K_B:

1. ϕ es *aceptada*: ϕ es consecuencia lógica de K_B, *i.e.*, $\phi \in Cn(K_B)$.

2. ϕ es *rechazada*: $\neg\phi$ es consecuencia lógica de K_B, *i.e.*, $\neg\phi \in Cn(K_B)$.

3. ϕ es *indeterminada*: ni ϕ, ni $\neg\phi$ son consecuencias lógicas de K_B, *i.e.*, $\phi \notin Cn(K_B)$ y $\neg\phi \notin Cn(K_B)$.

Actualizar una BC consiste en transformar creencias indeterminadas en aceptadas o rechazadas (*expansión*), transformar creencias aceptadas o rechazadas en indeterminadas (*contracción*), o bien, transformar creencias aceptadas en rechazadas y viceversa (*revisión*). Por consiguiente, el problema de actualizar una BC y sus consecuencias podría resolverse usando funciones de *expansión*, *contracción* y *revisión* análogas a las existentes.

El problema consiste en que no todas las creencias de K = $Cn(K_B)$ están registradas en el computador; sino que muchas de ellas se derivan (conocimiento implícito: $Cn(K_B)$-K_B) de un conjunto, necesariamente finito, (conocimiento explícito: K_B) que constituye la BC. Esto conduce a que dichas funciones operen sobre la base axiomática de K, es decir, sobre el conjunto K_B. Por lo tanto, una BC permite representar los hechos básicos sobre los cuales un individuo fundamenta sus creencias. El criterio por el cual un individuo cree en una proposición o hecho ϕ, no es como en el modelo AGM, que ϕ es un elemento de su conjunto de creencias K. En lugar de eso, el criterio es que ϕ sea una consecuencia lógica de K. La intuición detrás de esta construcción es que algunas de nuestras creencias no tienen una independencia establecida, sino que surgen de nuestras creencias más básicas.

Un agente racional cree en las consecuencias lógicas de las creencias primarias, pero éstas consecuencias están sujetas directamente a los cambios que se realicen de las creencias primarias. Por ejemplo, si el agente cree en una proposición ϕ entonces es válido decir que también cree en $\phi\vee\psi$, para cualquier sentencia ψ del lenguaje. Sin embargo, si la creencia ϕ es abandonada, el agente pierde la creencia $\phi\vee\psi$. $\phi\vee\psi$ es automáticamente perdida cuando ya no es inferida de la BC. En el modelo AGM, la eliminación de $\phi\vee\psi$ tiene que ser asegurada por una función u otro mecanismo de selección.

Un mismo conjunto de creencias puede ser expresado por distintas bases de conocimiento. Por ejemplo, las bases $K_{B1} = \{\phi, \psi\}$ y $K_{B2} = \{\phi, \phi\rightarrow\psi\}$ tienen la misma clausura, es decir son “estáticamente equivalentes”, en el sentido que representan las mismas creencias. Sin embargo ellas no son “dinámicamente equivalentes”, debido a que no se comportan de igual manera bajo las operaciones de cambio. Si realizáramos una contracción de nuestras creencias por ϕ, podríamos tener que $K_{B1}{}^{-}\phi = \{\psi\}$ y $K_{B2}{}^{-}\phi = \{\phi\rightarrow\psi\}$ y, claramente ambos conjuntos resultantes no representan a una misma teoría lógica. En este sentido las bases de creencias poseen mayor poder expresivo que los conjuntos de creencias e introducen una estructura más granular.

La propuesta de usar bases de conocimiento en vez de conjuntos de creencias –lógicamente cerrados bajo consecuencia lógica– fue planteada por Alchourrón y Makinson [ALC82] y, por Makinson en [MAK87]. Algunas de las propiedades formales de cambio en bases de conocimiento también han sido investigadas por Hansson y Fuhrmann [HAN89] [FUH91] [HAN92] [HAN93b].

4. Actualización de Bases (BC) Horn

En esta sección analizaremos algunos aspectos de la aplicación de la teoría AGM de cambio de creencias a Bases de Conocimiento (BC), en torno a Horn como lenguaje de representación de conocimiento. El objetivo es definir funciones de expansión, contracción y revisión, no solo adecuadas desde el punto de vista teórico, sino también razonables (eficientes) en su costo computacional. Respecto a este último requerimiento, trabajar con bases de conocimiento nos permitirá hablar de implementaciones computacionales con costos razonables.

4.1 Introducción: Lenguaje de representación

Una BC estará representada por un "Programa Definido" (*definite program*) y el conjunto de todas sus consecuencias lógicas constituirá el estado epistémico de un agente. Un resultado importante que habla acerca de la potencia expresiva del lenguaje elegido, nos indica que cualquier función computable puede ser computada por un programa definido [LLO87]. Asimismo, la utilización del fragmento Horn como lenguaje de representación de conocimiento es ampliamente difundida en bases de datos lógicas y en el contexto de la programación en lógica. Es por esto que nos parece importante analizar el dinamismo de estados de creencias para este particular lenguaje de representación de conocimiento.

Al elegir un modelo para representar estados de creencias, es importante establecer cual es la lógica que gobierna a las creencias y en la práctica esto depende del mecanismo de demostración de teoremas usado en combinación con la base de datos [GÄR92]. El mecanismo lógico de inferencia considerado para modelar el sistema epistémico será *SLD-resolución*[5] [KOW74],[APT82]. Este mecanismo, introducido por Kowalski, es un refinamiento del procedimiento original de resolución planteado por Robinson [ROB65]. La razones para usar *SLD-resolución* son:

- Constituye un procedimiento de inferencia *sano (correcto)* y *completo*, es decir, produce todas las respuestas correctas, y solo éstas, que se pretenden sean consecuencias lógicas de un programa definido [LLO87].
- Es aplicable en la demostración automática de teoremas a partir del fragmento Horn a considerar. Esto nos permitirá realizar implementaciones computacionales de la *teoría de cambio de creencias* para el lenguaje dado, bajo la eficiencia subyacente al mecanismo de prueba citado.
- Provee un formalismo adecuado (árboles SLD) para expresar las pruebas de una meta teniendo en cuenta demostraciones "minimales" en longitud, con respecto a las sentencias intervinientes de la BC. Este formalismo nos permitirá analizar las contracciones a través del análisis de árboles de pruebas reducidos y por consiguiente, lograr implementaciones aceptables en su costo computacional.

Los cambios epistémicos serán llevados a cabo en la BC aunque debemos considerar sus efectos en la teoría que abarca a las consecuencias lógicas derivadas del programa, es decir, sobre el *mínimo modelo de Herbrand* o su contraparte operacional: el *conjunto de éxito* del programa [LLO87].

4.1.1 Definiciones (lenguaje de representación) [LLO87]:

Átomo o *fórmula atómica*: Si p es un símbolo de predicado n-ario, y $t_1,...,t_n$ son términos formados a partir de las constantes, variables y símbolos de función del lenguaje, entonces $p(t_1,...,t_n)$ es una fórmula atómica. Un átomo sin variables es llamado *átomo básico o ground* (hecho básico). En general, una fórmula sin variables es una sentencia ground. Un *literal* es una átomo o una átomo negado.

Una *cláusula de programa definida* es un fórmula del siguiente tipo: $B \leftarrow A_1 \wedge ... \wedge A_n$, donde B (cabeza), $A_1,...,A_n$ (cuerpo) son átomos. El caso particular en que n=0, B constituye una cláusula unitaria, un hecho (simplemente B o $B\leftarrow$). Todas las variables que aparecen en la cabeza de una cláusula se asumen cuantificadas universalmente y, las que ocurren en el cuerpo y no están en la cabeza se consideran cuantificadas existencialmente. La semántica declarativa de una cláusula de programa definida es heredada del Cálculo de Predicados. La semántica informal de $B \leftarrow A_1 \wedge ... \wedge A_n$ es: "para cada instancia de las variables que ocurren en la cláusula, si todas las A_i se satisfacen, entonces B se verifica". De este modo, si n>0, una cláusula de programa es condicional (una implicación). Por otro lado, una cláusula unitaria ($B\leftarrow$) es incondicional y su semántica informal es: "para cada instancia de las variables que ocurren en B, B se verifica".

Una *meta definida* es una cláusula de la forma $\leftarrow A_1 \wedge ... \wedge A_n$, donde cada A_i es un átomo y las variables de la meta se asumen cuantificadas existencialmente. El Cálculo de Predicados

[5] Resolución-SLD: resolución *lineal* con función de *selección* para cláusulas *definidas*.

interpreta una meta como la negación de las condiciones a ser satisfechas. Una cláusula que no posee ningún literal es llamada cláusula o meta vacía, y será entendida como una contradicción ($\perp$). Por último, un *programa definido* es un conjunto de cláusulas de programa definidas y una cláusula de Horn es o bien una cláusula de programa definida o, una cláusula que representa a una meta definida.

4.2 Operaciones de Cambio

Nuestra intención es analizar y definir las operaciones de cambio de creencias sobre una BC a partir de sentencias simples. Esto es, las sentencias que disparan los cambios serán restringidas inicialmente a átomos sin variables libres (*átomos básicos o ground*) y a conjunciones de éstos. A continuación exponemos el análisis para las operaciones de cambio en base a *programas definidos*.

4.2.1 Consideraciones Previas

En el contexto del Cálculo de Predicados, una sentencia A se deduce de un conjunto P si $P\cup\{\neg A\}$ es inconsistente. Luego, una meta definida puede interpretarse como la negación de un teorema a ser probado a partir de un conjunto de axiomas (programa definido), donde una meta A es derivable de un programa definido P, si su negación es inconsistente con P. Cada demostración, teniendo en cuenta las sustituciones que causan que $P \cup \{\neg A\}$ ($P \cup \{\leftarrow A\}$) sea inconsistente, constituye un contraejemplo (una refutación) de la meta negada, esto es, una instancia bajo la cual se satisfacen las condiciones de la meta.

Si K_B es un Programa Definido y A es una consecuencia lógica de K_B, entonces por Completitud (Completeness) del principio de Resoución *SLD-resolución*, sabemos que existe una refutación por resolución del conjunto $K_B \cup \{\leftarrow A\}$, llamada *SLD-refutación* y un correspondiente *árbol de refutación* (árbol-SLD) con raíz $\neg A$ ($\leftarrow A$), con al menos una rama exitosa. Formalmente, sea K_B un Programa Definido y A una meta definida. Un árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow A\}$ es un árbol que satisface las siguientes condiciones:

(**a**) Cada nodo del árbol es una meta definida (posiblemente vacía).

(**b**) El nodo raíz es A.

(**c**) Sea $\leftarrow A_1\wedge...\wedge A_m\wedge...\wedge A_k$ ($k\geq1$) un nodo en el árbol y supongamos que A_m es el átomo seleccionado por alguna regla de computación. Entonces, para cada cláusula $A\leftarrow B_1\wedge...\wedge B_q$ ($q\geq0$) perteneciente a K_B, tal que A_m y A son unificables con *mgu* (unificador más general [LLO87]) θ, el nodo tiene como hijo a la meta: $\leftarrow (A_1\wedge...\wedge A_{m-1}\wedge B_1\wedge...\wedge B_q\wedge A_{m+1}\wedge...\wedge A_k)\theta$.

(**d**) Los nodos que son cláusulas vacías no tienen hijos (son hojas).

Cada rama del árbol-SLD que culmina con una meta (cláusula) vacía es una *rama exitosa* de derivación de A a partir de K_B. Las ramas que culminan con una meta no vacía, cuyo átomo seleccionado es irreducible, reciben el nombre de *ramas fallidas*. Por último, las ramas de un árbol-SLD que no son exitosas ni fallidas son ramas infinitas.

Los resultados sobre Programas Definidos y *SLD-resolución* nos indican que la regla de computación que selecciona átomos en el paso (c) de la definición anterior, no es relevante. Esto es, para cualquier elección de regla de computación, si $K_B \cup \{\leftarrow A\}$ es insatisfactible (A es consecuencia de K_B), podemos encontrar una refutación usando dicha regla. Este resultado nos autoriza a no tener que buscar reglas de computación alternativas en el paso (c).

4.2.2 Expansión

La formulación de la Expansión es casi directa. Se incorpora el hecho a la BC, bajo las siguientes condiciones:

$K_B{}^{+}A = K_B$ si $K_B \vdash A$ y $K_B{}^{+}A = K_B\cup\{A\}$ en caso contrario.

Observemos que la notación $K_B\vdash A$ implica que existe una refutación por resolución para el conjunto $K_B\cup\{\leftarrow A\}$. Esto es, existe al menos una rama exitosa en el árbol-SLD para $K_B\cup\{\leftarrow A\}$.

Sin embargo, debido a que al trabajar con Bases de Conocimiento estamos asumiendo un modelo de dos capas, diferenciando creencias básicas de derivadas, la anterior definición puede resultar inadecuada en ciertos casos. Si $K_B \vdash A$, puede pasar que $A \in K_B$ (conocimiento explícito), o bien que $A \in (Cn(K_B)\text{-}K_B)$ (conocimiento implícito). En este último caso resulta más apropiado incorporar la creencia A a K_B, aunque A pertenezca a la teoría $Cn(K_B)$, ya que el nuevo status de A sería el de un conocimiento explícito y no implícito, con lo que esto significa respecto al mantenimiento de las creencias. Luego, una definición más apropiada es:

$K_B{}^+A = K_B$ si $A \in K_B$ (A es una creencia explícita en K_B) y,

$K_B{}^+A = K_B \cup \{A\}$ en caso contrario (A es una creencia implícita o indeterminada en K_B)

Como vemos, esta definición resalta aún más la distinción entre conocimiento explícito y derivado, ya que si A fuera una sentencia derivada, igualmente sería agregada en el proceso de expansión. Esto también trae aparejado la pérdida de relevancia de la sentencia a incluir.

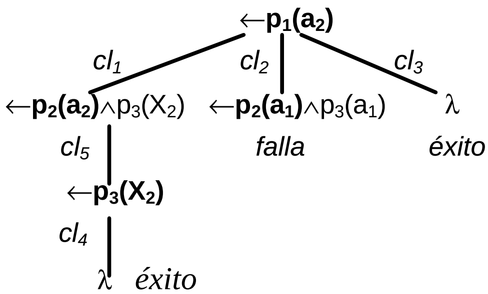
4.2.3 Contracción

Para el caso de una contracción, el tema no es tan simple como en el caso anterior. Deberíamos considerar todas las derivaciones posibles de la sentencia a contraer a partir de la BC. Una idea sería, para contraer una átomo A a partir de una Base K_B, disponer del conjunto de las demostraciones minimales[6] de A desde K_B y en base a ello eliminar de cada demostración al menos una regla usada de la base para evitar que A sea inferida. Esta idea se fundamenta en el método *Safe Contraction* [ALC85], adaptado a BC y en una versión más general, llamada *Kernel Contraction* [HAN94]. Luego, la noción de árbol-SLD previamente introducida se adapta al requerimiento planteado respecto de la construcción de "demostraciones minimales", y es por ello que constituirá el formalismo elegido en el análisis de las contracciones.

Definición: Sea K_B un Programa Definido y sea A un átomo básico que constituye una meta definida. Llamaremos $\mathbf{K_B \perp\!\!\!\perp A}$ al *conjunto de todas las ramas exitosas* en el árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow A\}$[7]. Es decir, $K_B \perp\!\!\!\perp A$ es un conjunto de secuencias de metas, donde cada secuencia termina con la cláusula vacía (λ) y representa una prueba para A.

Asumiremos la siguiente notación para secuencias: $[x_1,..., x_k]$ denota la secuencia de $x_1,..., x_k$.

Ejemplo: Consideremos la siguiente BC (Programa Definido), $K_B = \{cl_1,...,cl_6\}$ con: $\boldsymbol{cl_1}$:$p_1(X_1) \leftarrow p_2(X_1) \wedge p_3(X_2)$, $\boldsymbol{cl_2}$:$p_1(X_1) \leftarrow p_2(a_1) \wedge p_3(a_1)$, $\boldsymbol{cl_3}$:$p_1(a_2)$, $\boldsymbol{cl_4}$:$p_3(X_1)$, $\boldsymbol{cl_5}$:$p_2(a_2)$. El árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow p_1(a_2)\}$, teniendo en cuenta un regla de computación que elige siempre el átomo que ocurre más a la izquierda en una meta definida, es:



Definición: Llamaremos $\mathbf{CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)}$ al *conjunto de las secuencias de cláusulas (CLs) de la BC K_B usadas en* $K_B \perp\!\!\!\perp A$, es decir, $CLs(KB_A)$ es el conjunto de las secuencias de cláusulas de K_B usadas en la construcción de cada rama exitosa del árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow A\}$.

En el ejemplo anterior, $CLs(K_B \perp\!\!\!\perp p1(a2)) = \{[cl_1, cl_5, cl_4], [cl_3]\}$. Ahora podemos definir una función de contracción para una BC. Sea K_B un Programa Definido y A un átomo básico, podríamos eliminar de K_B todas las reglas en $CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)$ pero esto significaría, en general, demasiada pérdida de información. Basta con eliminar a lo sumo una regla de cada secuencia perteneciente a $CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)$. Decimos "a lo sumo" porque una cláusula podría intervenir en más de una rama exitosa del árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow A\}$, luego al eliminar una cláusula de la BC ciertas pruebas de A podrían desaparecer.

---

[6] Pruebas minimales: usan subconjuntos mínimos (respecto de la inclusión) de la BC para deducir una sentencia.

[7] $K_B \perp\!\!\!\perp A$ es llamado "conjunto Kernel" en el contexto del método Kernel Contraction [HAN94].

Sean $s_1,...,s_n$ las secuencias en $CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)$ con $n \geq 1$ y *"**Sel**"* una función que selecciona una cláusula de cada s_i, de acuerdo a algún criterio determinado. Esto es: $\forall i{:}1 \leq i \leq n$ $Sel(s_i) \in Set(s_i)$, donde ***Set*** es la inserción natural de Secuencias en Conjuntos: $Set([x_1,...,x_n]) = \{x_1,...,x_n\}$. Notemos que cada s_i es una secuencia no vacía, esto se sigue de la definición de ramas exitosas de una árbol-SLD.

__Definición__: La función *"**Del**"* determina las sentencias a eliminar de una BC K_B, a fin de que una sentencia A no forme parte del estado epistémico de un agente, teniendo en cuenta para cada secuencia de cláusulas s_i perteneciente a $CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)$ (que determina una prueba de A):

$Del(K_B, A)^{Si} = \{Sel(s_i)\}$ siempre que, $Set(s_i) \cap (\bigcup_{1 \leq j < i} Del(K_B, A)^{Sj}) = \varnothing$

$Del(K_B, A)^{Si} = \varnothing$ en otro caso.

La unión de estos conjuntos constituye un "conjunto de corte" para la sentencia A, tal que suprimido de la base evita que la sentencia sea inferida de la base de conocimiento resultante. Luego:

$$\mathbf{K_B^- A = K_B - \bigcup_{Si \in CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)} Del(K_B, A)^{Si}}$$

La función de contracción previamente definida, satisface los postulados básicos de contracción adaptados para Bases, excepto el correspondiente a K^-5 que generalmente no se satisface en el contexto de bases (BC). Más adelante, volveremos sobre este punto y la necesidad de garantizar mínima pérdida de información en función al principio de "economía de la información". Entre los criterios de selección "*Sel*" para las cláusulas que intervienen en una rama exitosa de un árbol-SLD, podríamos citar:

Sel_1: $Sel([cl_1,...,cl_k]) = cl_i$ "la i-ésima cláusula usada, $1 \leq i \leq k$"

Sel_2: $Sel([cl_1,...,cl_k])$ es alguna cláusula unitaria (hecho) $cl_i \in \{cl_1,...,cl_k\}$. Un hecho básico es preferible a una cláusula unitaria no básica.

El segundo criterio parece, en ciertos casos, ser más adecuado, teniendo en cuenta que los hechos básicos son en general "menos importantes" que las leyes generales (cuantificadas universalmente)[8] [FAL95a], [FAL95b]. Pero bajo este criterio podríamos eliminar una cláusula no básica, en este caso asumimos –bajo este criterio– que igualmente es preferible eliminar el hecho antes que una cláusula condicionada.

Una restricción sobre el lenguaje de representación de conocimiento que resultaría simplificadora, consistiría en solo permitir hechos básicos sin variables (átomos ground) como cláusulas unitarias. Bajo esta limitación, el criterio Sel_2 es indudablemente apropiado, ya que las contracciones no eliminarían cláusulas generales cuantificadas universalmente, sino hechos particulares. Sin embargo, nuestro interés se centra en el análisis más general posible para el sistema de representación en estudio. Es por ello que no solo permitiremos cláusulas unitarias básicas, sino también cuantificadas universalmente sobre un dominio de discurso que contempla los términos ground que pueden formarse a partir del lenguaje considerado. Todo el análisis subsiguiente contempla esta postura.

Los dos criterios apuntados se basan en una hipótesis de naturaleza básicamente sintáctica para decidir entre las posibles cláusulas a eliminar. Como consecuencia, la implementación resulta "sencilla", aunque impregnada de una arbitraria distinción sintáctica. Una alternativa sería considerar un orden de importancia epistémica [GÄR88a] pero no solo con respecto a cláusulas sin variables libres, sino también en base a cláusulas de programa definidas que poseen variables cuantificadas universalmente. En este caso, si dicho orden es $\leq$, podríamos considerar al criterio *"Sel"*, como la función que elige la cláusula menos importante. Esto es: $Sel_{min\leq}([cl_1,...,cl_k]) = min_{\leq}\{cl_1,...,cl_k\}$.

Es importante destacar que en realidad todo el análisis realizado para las contracciones nos permite, no solo operar con un átomo básico sino en general con una conjunción de átomos básicos, ya que la definición de árbol-SLD se explicitó para una meta definida arbitraria. Así,

[8] La importancia comparativa se vincula al poder deductivo caracterizado por las sentencias cuantificadas universalmente en función de los hechos básicos. Un hecho particular refiere a unos pocos elementos del universo de discurso; en cambio, cada creencia cuantificada (regla general) alude a una colección de objetos de dicho universo.

$K_B^-(A_1 \wedge ... \wedge A_n)$ sigue las definiciones previas de contracción, donde la raíz del árbol-SLD es $\leftarrow A_1 \wedge ... \wedge A_n$. Sin embargo, al considerar contracciones por conjunciones de átomos básicos, puede observarse que si bien los postulados adicionales se satisfacen para los dos criterios sintácticos planteados –además del postulado "recovery"– el postulado (K^-6) no se satisface. Por ejemplo, al contraer una BC por una conjunción $\phi \wedge \psi$, dependiendo de la regla de computación elegida en la construcción del árbol-SLD, los criterios planteados pueden llevarnos a eliminar una sentencia de la BC en el caso de una rama exitosa en el árbol de la meta $\leftarrow \phi \wedge \psi$ y otra sentencia, en el caso de la meta $\leftarrow \psi \wedge \phi$ (equivalente a la anterior)[9].

Una solución al problema correspondiente al postulado (K^-6), consistiría en definir un orden entre los átomos que componen una meta definida y computar el árbol-SLD para una meta equivalente a la inicial. Por ejemplo aquella ordenada ascendentemente (o descendentemente) en dicho orden. Así, en el caso de las metas $\leftarrow \phi \wedge \psi$ y $\leftarrow \psi \wedge \phi$, el árbol-SLD para ambas sería el mismo en relación a una BC, teniendo en cuenta la relación de orden entre los átomos ϕ y ψ. Este orden podría ser de naturaleza puramente sintáctica, o un orden de importancia epistémica referido a átomos básicos. Volveremos sobre esta idea más adelante.

En el caso del criterio Sel_1 y cualquier otro criterio que se fundamente en una posición específica de una rama exitosa de un árbol-SLD en análisis, la solución previa parece ser una opción adecuada. En el caso del criterio Sel_2,, una solución que no influye en la construcción del árbol, podría formularse de la siguiente manera: (**$Sel_{2'}$**) $Sel([cl_1,...,cl_k])$ es alguna cláusula unitaria (hecho) $cl_i \in \{cl_1,...,cl_k\}$, determinada como sigue: el mínimo (o máximo) hecho básico de $[cl_1,...,cl_k]$, si existe al menos un hecho básico. En caso contrario, la mínima (o máxima) cláusula unitaria no básica en la secuencia. En este criterio la noción de orden entre los hechos podría definirse, nuevamente, sintáctica (un orden lexicográfico sobre los hechos) o semánticamente.

Análisis del postulado "recovery (K^-5)" en *programas definidos*

El análisis previo nos permite dar soluciones parciales al problema de la contracción de una BC constituida por un programa definido, según los criterios postulados por el modelo AGM. La pérdida mínima de información según la describe el postulado "recovery", no se cumple según las soluciones planteadas anteriormente. La razón es que este postulado generalmente no se satisface sobre conjuntos no clausurados, excepto en lenguajes muy reducidos [HAN93a] [GÄR88a].

Una manera de garantizar la satisfacción del postulado "recovery" en una contracción $K_B^-\Phi$, surge con el análisis del espíritu y las consecuencias de este postulado para conjuntos de creencias. En conjuntos de creencias, "recovery" determina que para toda sentencia ψ y para toda teoría K, si $\psi \in K$ y $\psi \notin K^-\phi$ entonces $\phi \rightarrow \psi \in K^-\phi$. Luego, en el intento de capturar esta propiedad en bases que representan programas definidos, proponemos: "adicionar por cada regla eliminada ($q \leftarrow p_1 \wedge ... \wedge p_n$ con $n \geq 0$) para satisfacer el éxito de la contracción $K_B^-\Phi$, la cláusula $q \leftarrow p_1 \wedge ... \wedge p_n \wedge \Phi$". De esta manera, redefinimos la contracción como sigue:

$$\mathbf{K_B^-\Phi = (K_B - \bigcup_{Si \in CLs(K_B \perp\!\!\!\perp \Phi)} Del(K_B,\Phi)^{Si}) \cup \{q \leftarrow p_1 \wedge ... \wedge p_n \wedge \Phi \mid q \leftarrow p_1 \wedge ... \wedge p_n \in \bigcup_{Si \in CLs(K_B \perp\!\!\!\perp \Phi)} Del(K_B,\Phi)^{Si}\}}$$

donde, cada s_i es una rama exitosa en el árbol-SLD para la meta $\leftarrow \Phi$ y la base K_B. Φ es una fórmula atómica básica ($\leftarrow A$) o a una conjunción de fórmulas atómicas ($\leftarrow A_1 \wedge ... \wedge A_n$, $n \geq 2$) ground.

Esta solución permite satisfacer el conjunto de los postulados (teniendo en cuenta los criterios *Sel* adecuados, analizados previamente) que rigen a la contracción según el modelo AGM, con algunas consideraciones. El postulado K^-2 ($K^-\phi \subseteq K$), conocido como postulado de *inclusión*, no se cumple debido a la incorporación de creencias en la contracción. En realidad, si bien *inclusión* no se satisface en el nivel simbólico (en el contexto BC), sí se verifica en el nivel de conocimiento. Esto es, $Cn(K^-\phi) \subseteq Cn(K)$ vale para la solución propuesta, y es ésta en realidad la propiedad que nos interesa asegurar en relación al postulado en cuestión. Asimismo, "recovery": $K \subseteq (K^-\phi)^+\phi$ no se satisface estrictamente para el operador formulado, aunque si un pseudo-recovery:

[9] En general es difícil satisfacer el postulado referido en bases de conocimiento –en el nivel simbólico–, ya que refiere al nivel de conocimiento, esto es, al conjunto de creencias asociado a la base.

$Cn(K) \subseteq Cn((K^{-}\phi)^{+}\phi)$ que captura "en cierta medida" su esencia. Notemos que $Cn(K^{-}\phi) \subseteq Cn(K)$ y $Cn(K) \subseteq Cn((K^{-}\phi)^{+}\phi)$ valen tanto para las funciones de contracción caracterizadas por AGM, como para el operador de contracción previamente definido. Sin embargo, $K^{-}\phi \subseteq K$ y $K \subseteq (K^{-}\phi)^{+}\phi$ valen en el contexto AGM pero no para la función presentada[10].

<u>Ejemplo</u>: Sea el siguiente programa definido: K_B = {sólido(X)$\leftarrow$metal(X), metal(mercurio)} y supongamos que realizamos una contracción con respecto a *sólido(mercurio)*. Podría darse el caso en que se elimine la regla "sólido(X)$\leftarrow$metal(X)" según el criterio adoptado (Ej. Sel_1), y en este caso:

(1) K_B^{-}sólido(mercurio) = {sólido(X)$\leftarrow$metal(X)$\wedge$sólido(mercurio), metal(mercurio)}.

Si la regla eliminada fuera metal(mercurio) –bajo el criterio Sel_2, por ejemplo–,

(2) K_B^{-}sólido(mercurio) = {sólido(X)$\leftarrow$metal(X), metal(mercurio)$\leftarrow$sólido(mercurio)}.

Estas soluciones si bien son correctas e implementables de manera muy simple y eficiente, pueden llegar a oscurecer la base de conocimiento (caso 1 en el ejemplo previo), y en algunos casos a afectar la declaratividad del programa; aunque esta manera de garantizar "recovery" es totalmente adecuada en el contexto de conjuntos clausurados. Por otro lado, al incluir reglas para satisfacer un pseudo-recovery podemos llegar a generar árloles-SLD con ramas infinitas para ciertas metas definidas. Salvo que garantizemos que los árboles se generan por niveles (y no en profundidad), obtendríamos una máquina de inferencia incompleta, pues se le "escaparían" algunas soluciones en ciertos casos. Observemos que en el caso 2 del ejemplo precedente, la meta definida $\leftarrow$sólido(mercurio) genera una rama infinita en el árbol correspondiente[11].

De los criterios sintácticos analizados, resulta ser Sel_2' el que afecta en menor medida la claridad y declaratividad de los programas. Sin embargo, podríamos considerar métodos alternativos con el objetivo de satisfacer, por un lado, la claridad y declaratividad de una base actualizada, y por el otro, garantizar la mínima pérdida de información en un cambio epistémico y la composicionalidad de las operaciones de cambio (ver sección 4.3).

4.2.4 Revisión

A partir del lenguaje considerado, los *programas definidos*, y a través de *SLD-Resolución*, es imposible derivar algún tipo de información negativa [LLO87]. De las tres actitudes epistémicas consideradas para una sentencia con respecto a una BC: Aceptación, Rechazo e Indeterminación, la segunda no está presente en el sistema de conocimiento programas definidos/SLD-resolución. Luego, siempre tendremos una BC consistente y, las expansiones y contracciones posibles de una BC serán únicamente a partir de literales positivos (átomos). Por consiguiente, bajo estas condiciones y de acuerdo a los postulados para revisiones presentados en la sección 2.3.2 –adaptados para Bases de Creencias–, la operación de revisión coincide con la de expansión; esto se deduce a partir de los postulados correspondientes a $\mathbf{K^{*}3}$ y $\mathbf{K^{*}4}$.

4.3 Sistemas Alternativos de Cambio de Creencias

En esta sección incluimos dos sistemas de cambio de creencias que extienden la representación clásica de estados epistémicos en función a bases de conocimiento. El primero incorpora el mantenimiento de "recuerdos" de las creencias abandonadas a causa de contracciones previas. El segundo se caracteriza por incluir "excepciones" en el conjunto de las creencias derivadas y por satisfacer un criterio diferente del concepto de máxima conservación del conocimiento luego de un cambio, que el considerado por AGM.

4.3.1 Modelo con Sensitividad a la Historia

A continuación presentamos una alternativa que refleja la concepción final planteada en 4.2.3 –para satisfacer estrictamente el postulado "recovery"–, desde un punto de vista más natural, en

[10] En la mayoría de los casos, el satisfacer "recovery" para bases trae aparejado el incumplimiento del postulado de inclusión, pues debemos adicionar sentencias con el objetivo de garantizar la recuperación de creencias perdidas indirectamente a causa de una contracción. Ambos postulados resultan básicamente incompatibles en el contexto BC.

[11] En general, la consulta por un hecho contraído genera árboles con ramas infinitas, debido a la naturaleza de la solución planteada para satisfacer "recovery".

lo que respecta a la claridad de las cláusulas que componen el conocimiento de un agente. La idea consiste en mantener en un nivel distinto al de estas creencias, un "recuerdo" (la historia) de las cláusulas abandonadas por ciertas creencias en contracciones previas; de este modo, podrán reincorporarse las cláusulas perdidas debido a la contracción por ciertas creencias, si estas creencias abandonadas son reafirmadas. La propuesta es considerar a un estado epistémico representado por un par: "la BC propiamente dicha y un conjunto de recuerdos (la historia de cambios previos)" y, por las consecuencias que se derivan de la base de creencias explícita. Los recuerdos son asociaciones (pares) que representan a las cláusulas suprimidas por ciertas sentencias en contracciones previas.

La parte explícita de un estado de creencias (**E_{KB}**) se representa por una BC K_B y por el conjunto de recuerdos: *recuerdos*(K_B), esto es, E_{KB} = < K_B , *recuerdos*(K_B) >, donde la función *recuerdos* para una BC tiene –conceptualmente– la siguiente imagen: *recuerdos*(K_B) = {<*cl* $\Leftarrow$ Φ>| cl es una cláusula eliminada por una contracción previa de Φ}. Φ representa a una sentencia $A_1 \wedge ... \wedge A_n$ con $n \geq 1$, donde cada A_i es un átomo básico. El símbolo "$\Leftarrow$" denota intuitivamente que si la creencia Φ es reafirmada, entonces la cláusula *cl*, abandonada, será recuperada (vía una expansión). De esta manera, la contracción tiene por objetivo –al igual que antes– eliminar reglas de la BC para asegurar el éxito de la operación, pero debe también incluir las asociaciones correspondientes a las cláusulas abandonadas, en el conjunto de recuerdos del nuevo estado epistémico del agente. Si definimos E = {E_{KB} | E_{KB} es una BC –con recuerdos–} y F = {$A_1 \wedge ... \wedge A_n$ | $n \geq 1$ y cada A_i es un átomo básico}, la contracción (~) en este modelo, la definimos como una función de E por F en E, como sigue: **$E_{KB}{}^{\sim}\Phi$ = <$K_B{}^{-}\Phi$, *recuerdos*($K_B{}^{-}\Phi$)>**.

El conjunto de "recuerdos" del agente –en el nuevo estado epistémico– se expande para incorporar las asociaciones relacionadas a las cláusulas eliminadas por la contracción (–), es decir,

$$\textbf{\textit{recuerdos}}(\mathbf{K_B{}^{-}\Phi}) = \textit{recuerdos}(K_B) \cup \{< cl \Leftarrow \Phi > \mid cl \in \bigcup_{S_i \in CLs(K_B \perp\!\!\!\perp \Phi)} Del(K_B,\Phi)^{S_i} \}$$

donde, cada s_i es una rama exitosa en el árbol-SLD para la meta ground $\leftarrow\Phi$ y la base K_B. Observemos que (–) es la contracción para una BC, tal como fue definida y analizada inicialmente (sin la incorporación de cláusulas para satisfacer "recovery"). Es decir, $K_B{}^{-}A = K_B - \bigcup_{S_i \in CLs(K_B \perp\!\!\!\perp A)} Del(K_B,A)^{S_i}$.

Luego, la expansión –o revisión– ($\oplus$) en este contexto es una función de E por F en E, que puede ser definida de la siguiente manera: "Las sentencias que componen la BC incorporan a la expansión clásica las creencias recobradas del conjunto de recuerdos del agente (en su estado epistémico). Esta recuperación se formaliza a través de una operación *recobra*, que dada una BC y una sentencia, retorna las sentencias plausibles ha ser restablecidas. Asimismo los "recuerdos" se reactualizan, suprimiendo aquellos que son recuperados". Esto es,

$E_{KB}{}^{\oplus}(\Phi)$ = < $K_B{}^{+}\Phi$ $\cup$ *recobra*(K_B,Φ) , *recuerdos*($K_B{}^{+}\Phi$) >. Donde Φ es una conjunción de átomos básicos, $\Phi = A_1 \wedge ... \wedge A_n$ ($n \geq 1$). Entonces,

$E_{KB}{}^{\oplus}(\Phi)$ = < $K_B \cup \{A_1,...,A_n\}$ $\cup$ *recobra*(K_B,Φ) , *recuerdos*($K_B{}^{+}\Phi$) >, y

***recobra*(K_B,Φ)** = **{**cl **|** <cl $\Leftarrow B_1 \wedge ... \wedge B_m$> $\in$ *recuerdos*(K_B) y $\{B_1,...,B_m\} \subseteq \{A_1,...,A_n\}$**}**

***recuerdos*($K_B{}^{+}\Phi$)**=**{**<cl $\Leftarrow B_1 \wedge ... \wedge B_m$ >**|**<cl$\Leftarrow B_1 \wedge ... \wedge B_m$**>**$\in$*recuerdos*($K_B$),$\{B_1,...,B_m\} \cap \{A_1,...,A_n\} \neq \emptyset$**}**

La operación de contracción formulada satisface los postulados AGM presentados, incluyendo "recovery". Sin embargo, la expansión de creencias, en este modelo, no se corresponde con la operación clásica de expansión caracterizada por AGM. La operación propuesta es una extensión propia de la expansión AGM, que además reincorpora sentencias abandonadas cuando éstas pueden ser reafirmadas.

Más allá del objetivo de satisfacer "recovery", podemos asumir que una creencia A abandonada a causa de la contracción de otra creencia B, puede ser recuperada aún cuando no sea explícitamente reafirmada B. Esto es, resulta coherente asumir que si B llega a ser parte –a través de una expansión– del estado epistémico E_{KB} del agente ($B \in Cn(K_B)$), A pueda ser reincorporada al conocimiento del mismo. Luego, esta extensión se plasma en las siguientes redefiniciones de conceptos planteados para la expansión:

recobra$(\mathbf{K_B},\Phi)$=$\{cl|$**<**$cl \Leftarrow B_1\wedge...\wedge B_m$**>**$\in$ *recuerdos*(K_B) y cada B_i cumple: $B_i \in$ *Cn*$(K_B{}^{+}\Phi)$ }

recuerdos$(\mathbf{K_B}^{+}\Phi)$=$\{$**<**$cl \Leftarrow B_1\wedge...\wedge B_m$**>** | **<**$cl \Leftarrow B_1\wedge...\wedge B_m$**>** $\in$ *recuerdos*(K_B) y, existe B_i tq $B_i \notin K_B{}^{+}\Phi\}$

Ejemplo: Retomemos el ejemplo previo, donde tenemos un estado de creencias E_{KB} compuesto por la BC K_B = {sólido(X)←metal(X), metal(mercurio)} y por un conjunto de recuerdos correspondiente a contracciones previas, que supongamos es: *recuerdos*$(K_B) = \varnothing$. Al realizar una contracción por el átomo básico A=sólido(mercurio), obtenemos: Si la regla eliminada es metal(mercurio), entonces $E_{KB}{}^{-}A$ es el estado epistémico compuesto por la BC $K_B{}^{-}A$ = {sólido(X)←metal(X)} y, por el conjunto de recuerdos: *recuerdos*$(K_B{}^{-}A)$ = {**<**metal(mercurio) $\Leftarrow$ sólido(mercurio)**>**}. Luego, al expandir el estado creencias previo por la conjunción B=sólido(mercurio)∧metal(oro), obtenemos el estado epistémico $(E_{KB}{}^{-}A)^{\oplus}B$ compuesto por la base {sólido(X)←metal(X), sólido(mercurio), metal(oro)} y por el conjunto de recuerdos: vacío ($\varnothing$).

Un detalle importante a observar es que la reincorporación en un instante *t* de información abandonada en un instante previo *t´*, podría causar problemas de inconsistencia si una creencia $\neg\phi$ formara parte del estado epistémico de un agente en *t* y ϕ fuese reincorporado indirectamente (a partir del conjunto de "recuerdos") a causa de una expansión por cierta creencia en *t*. Sin embargo, este problema no se presenta debido a la restricción subyacente de no permitir explicitar ni inferir información negativa a partir del sistema de representación del conocimiento considerado: *programas definidos/SLD-resolución*. En una teoría relacionada a un lenguaje de representación de conocimiento que permita derivar información negativa, la reincorporación indirecta de cierta información abandonada Φ, debería tener lugar siempre y cuando $\neg\Phi$ no forme parte del estado epistémico del agente. Esto es,

recobra$(\mathbf{K_B},\Phi)$=$\boldsymbol{\{}cl|$**<**$cl\Leftarrow B_1\wedge...\wedge B_m$**>**$\in$*recuerdos*$(K_B)$, $\boldsymbol{\neg cl\notin}$ ***Cn***$\boldsymbol{(K_B{}^{+}\Phi)}$ y cada B_i cumple:$B_i\in$*Cn*$(K_B{}^{+}\Phi)\boldsymbol{\}}$

El "modelo con sensitividad a la historia" permite evitar introducir cláusulas nuevas al conocimiento de un agente a fin de satisfacer "recovery", manteniendo en un nivel distinto al de las creencias del agente las creencias abandonadas a causa de otras. La filosofía (estrategia) subyacente en este modelo expresa que toda creencia perdida indirectamente a causa de otra puede ser recuperada posteriormente si esta última es reafirmada (independientemente de la serie de cambios intermedios producidos). Una filosofía (estrategia) alternativa será expuesta en el "modelo de cambio con excepciones".

Ahora, teniendo en cuenta los postulados adicionales para la contracción por conjunciones, podríamos pensar en eliminar un componente de una conjunción determinada para satisfacer el éxito de la operación. Bajo este enfoque, resalta aún más la concepción que el análisis de la contracción de conjunciones es una extensión del realizado para las fórmulas simples.

Sea K_B una BC (Programa Definido) y consideremos la contracción $K_B{}^{-}(A_1\wedge...\wedge A_n)$. Si existe al menos una rama exitosa en el árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow A_1\wedge...\wedge A_n\}$ ($A_1\wedge...\wedge A_n \in$ *Cn*(K_B)), entonces podríamos proceder a la contracción de una componente A_i. Si consideramos un orden $\leq$ entre los hechos básicos que componen una meta definida, el A_i podría determinarse según ese orden como el elemento mínimo (por ejemplo). El orden $\leq$ puede ser de naturaleza básicamente sintáctica, como un orden lexicográfico restringido a átomos sin variables, o puede ser un orden de importancia epistémica. Notemos que en este último caso, el orden epistémico solo se plantea para hechos básicos, lo cual hace más factible su concepción que en el caso del orden epistémico considerado para el criterio "$Sel_{min\leq}$" analizado. De este modo, tenemos que:

$$\mathbf{K_B{}^{-}(A_1\wedge...\wedge A_n) = K_B{}^{-}A_i} \quad \text{si: } A_1\wedge...\wedge A_n\in Cn(K_B) \quad \text{y} \quad \mathbf{K_B{}^{-}(A_1\wedge...\wedge A_n) = K_B}, \text{ en caso contrario}$$

$A_i = \min_{\leq}\{A_1,...,A_n\}$, $n\geq 1$. Observemos que obviamente, si la conjunción $A_1\wedge...\wedge A_n$ es derivable de las creencias que constituyen una BC, para todo A_i ($1\leq i\leq n$) existe al menos una rama exitosa en el árbol de demostración correspondiente a la meta $\leftarrow A_i$.

4.3.2 Modelo de Cambio con "Excepciones" (*perezoso*)

Ejemplo: Sea K_B = {p(X)}, entonces los hechos $p(a_1),...,p(a_n)$ resultan ser consecuencias de las creencias representadas por K_B para las constantes $a_1,...,a_n$ del lenguaje. Si realizamos $K_B{}^{-}p(a_i)$

para $1 \le i \le n$, según los modelos planteados hasta el momento, deberíamos eliminar la cláusula p(X), resultando $K_B^{-}p(a_i) = \emptyset$. Sin embargo, en cierto contexto y bajo determinadas convicciones nos podría interesar retener las creencias p(X) para aquellos casos en que $X \neq a_i$.

A continuación exponemos un análisis de cambio de creencias según esta filosofía (estrategia), que formalmente enunciamos bajo el siguiente principio:

Min⁻: *Para toda base de conocimiento K y para todas $\phi,\psi \in Cn(K)$, si existe una prueba de ψ independiente de ϕ, entonces $\psi \in Cn(K^{-}\phi)$*

donde K es una base de conocimiento y una prueba de ψ independiente de ϕ en el contexto de árboles-SLD, es una rama exitosa de $K \cup \{\leftarrow\phi\}$ donde no interviene ψ.

Este postulado expresa la noción de mínima pérdida desde una postura diferente que el postulado "recovery" ($K \subseteq (K^{-}\phi)^{+}\phi$) adaptado para bases. De hecho, si la propiedad *Min⁻* es satisfecha por una función de contracción AGM (–) , se cumple que (–) verifica "recovery". La reversa no vale en general, basta con observar el ejemplo previo. Entonces, resulta de particular importancia definir un sistema de cambio de creencias donde la contracción verifique –además– el postulado *Min⁻*. Con tal fin podríamos considerar el postulado de *pseudo-inclusión* presentado previamente: $Cn(K^{-}\phi) \subseteq Cn(K)$, ya que la satisfacción conjunta de *inclusión* ($K^{-}\phi \subseteq K$) y *Min⁻* podría resultar incompatible. El espíritu subyacente en la construcción del nuevo modelo consiste en asumir que el abandono de creencias a causa de una contracción por una sentencia A, no necesariamente se traduce en la eliminación de cláusulas de la BC usadas en la prueba de A, tal como hemos analizado hasta ahora. El objetivo es restringir el conjunto de las pruebas posibles de una sentencia, asumiendo una concepción *perezosa* de la contracción de creencias.

Un estado de creencias será representado por un par $< K_B , K_{B,del} >$ y por todas las consecuencias lógicas que pueden obtenerse a partir de K_B, usando SLD-resolución pero restringiendo las pruebas a $K_{B,del}$. K_B representa la BC, es un Programa Definido; $K_{B,del}$ es el conjunto de los hechos básicos contraídos en cambios de creencias realizados (conjunto de excepciones para las pruebas). La idea es que ahora, una conjunción de hechos básicos ($A_1 \wedge ... \wedge A_n$) resulta ser consecuencia de una base K_B, si existe –al igual que antes– al menos una rama exitosa en el árbol-SLD para $K_B \cup \{\leftarrow A_1 \wedge ... \wedge A_n\}$, pero donde no se use ninguno de los hechos básicos pertenecientes a $K_{B,del}$. Es decir, los hechos no válidos (de $K_{B,del}$) no pueden constituir un fundamento en la demostración de una sentencia, pues son creencias abandonadas por el agente.

Formalmente, sea el estado de creencias (explícito) representado por $E_{KB} = < K_B , K_{B,del} >$; $\Phi = A_1 \wedge ... \wedge A_n$ con $n \ge 1$ una conjunción de átomos básicos y; $s_1,...,s_n$ las secuencias de metas definidas en $K_B \Vdash \Phi$, esto es los caminos de demostración de Φ a partir únicamente de la BC K_B. Definimos el conjunto de las secuencias de demostración de Φ a partir de K_B teniendo en cuenta las excepciones de $K_{B,del}$, de la siguiente manera:

$\mathbf{Demo}_{Ekb,\Phi} = \{ s_i \mid \text{Metas}(s_i) \cap K_{B,del} = \emptyset \text{ y } 1 \le i \le n \}$, con

$\text{Metas}([\leftarrow m_1, ..., \leftarrow m_r]) = \{ cl \mid \leftarrow cl_1 \wedge ... \wedge cl_k \wedge cl \wedge cl'_1 \wedge ... \wedge cl'_t \in \{\leftarrow m_1, ..., \leftarrow m_r\}, \text{ con } k,t \ge 0 \text{ y } r \ge 1 \}$

Luego, restringimos el conjunto de las consecuencias lógicas obtenidas a partir de una BC K_B y el operador de consecuencia *Cn* (asumido por la regla de *SLD-resolución*), como sigue:

$$\Phi = A_1 \wedge ... \wedge A_n \in Cn'(E_{KB}) \quad \text{sssi} \quad \mathbf{Demo}_{Ekb,\Phi} \neq \emptyset.$$

Es importante resaltar que *Cn*' no constituye en sí un nuevo operador de consecuencia, sino que denota la restricción de *Cn* en ciertas pruebas obtenidas usando *SLD-resolución*. Esto es, implica el descarte de ciertos teoremas usando *Cn*, pero no introduce un nuevo concepto de deducción. Sea *E = { E_{KB} | E_{KB} es un estado de creencias representado por $< K_B , K_{B,del} >$ y las consecuencias demostrables en función a Cn' }* y *F = {$A_1 \wedge ... \wedge A_n$ | $n \ge 1$ y cada A_i es un átomo básico}*. Bajo este enfoque podríamos definir una función de expansión –revisión– ($\oplus$) de E por F en E, como sigue:

$\mathbf{E_{KB}^{\oplus}(A_1 \wedge ... \wedge A_n) = <K_B^{+}(A_1 \wedge ... \wedge A_n) , K_{B,del} - \{A_1,...,A_n\}> = <K_B \cup \{A_1,...,A_n\} , K_{B,del} - \{A_1,...,A_n\}>}$. Esto es, la expansión se comporta como la expansión clásica caracterizada por AGM sobre la BC K_B, pero además elimina las restricciones que pudiesen existir –en base a contracciones previas– con respecto a las creencias incorporadas ($A_1,...,A_n$). Definimos la contracción en este modelo, como una función (~) de E por F en E, como sigue:

Si $\mathbf{Demo}_{Ekb,\Phi} \neq \emptyset$ ($\Phi = A_1\wedge...\wedge A_n$)**:**

Si $\mathbf{min}_{\leq}\{A_1,...,A_n\}\in K_B$**:** $E_{KB}\,\tilde{}\,(A_1\wedge...\wedge A_n) = < K_B\text{-}\{min_{\leq}\{A_1,...,A_n\}\}\ ,\ K_{B,del} >$

"*la creencia a eliminar* ($min_{\leq}\{A_1,...,A_n\}$) *es explícita en* K_B"

Si $\mathbf{min}_{\leq}\{A_1,...,A_n\}\notin K_B$**:** $E_{KB}\,\tilde{}\,(A_1\wedge...\wedge A_n) = < K_B\ ,\ K_{B,del} \cup\{min_{\leq}\{A_1,...,A_n\}\} >$

"*la creencia a eliminar* ($min_{\leq}\{A_1,...,A_n\}$) *es implícita en* K_B"

Si $\mathbf{Demo}_{Ekb,\Phi} = \emptyset$ ($\Phi = A_1\wedge...\wedge A_n$)**:** $E_{KB}\,\tilde{}\,(A_1\wedge...\wedge A_n) = E_{KB} = < K_B\ ,\ K_{B,del} >$

"*la sentencia* $A_1\wedge...\wedge A_n$ *no es derivable desde el estado de creencias* E_{KB}"

Observemos que en $K_{B,del}$ guardamos solamente las creencias explícitamente abandonadas por el agente. Al contraer por una conjunción de hechos, sólo aquél componente de una conjunción explícitamente retraído formará parte de las creencias abandonadas. Así definida, la contracción satisface todos los postulados (incluso los adicionales) y permite reflejar una concepción más adecuada del concepto de mínima pérdida, ya que satisface *Min*$^{-}$ (adoptando a *Cn*' en lugar de *Cn*). Notemos que en el caso del ejemplo anterior donde teníamos una BC $K_B = \{p(X)\}$ y podíamos derivar los hechos $p(a_1),...,p(a_n)$ para las constantes $a_1,...,a_n$ del lenguaje. Luego de realizar la contracción $K_B^{-}p(a_i)$ para algún i ($1\leq i\leq n$), según los modelos planteados anteriormente tenemos que $p(a_j) \notin Cn(K_B^{-}p(a_i))$ para $1\leq i,j\leq n$. Sin embargo, en el nuevo modelo podemos seguir infiriendo $p(a_j)$ para $i\neq j$ (si $p(a_j)$ no es una excepción: $p(a_j) \notin K_{B,del}$).

<u>*Ejemplo*</u>: Supongamos que un científico cree en K_B = { propiedadΩ(X)$\leftarrow$elemento**Q**(X) $\wedge$ metal**Q**(X), elemento**Q**(mercurio), metal**Q**(mercurio) }. Asumamos además que él contrajo previamente sus creencias respecto del hecho elemento**Q**(acero), entonces $K_{B,del}$ = {elemento**Q**(acero)}. Si luego el científico descubre que no es cierta la conjunción "elemento**Q**(mercurio) $\wedge$ propiedadΩ(mercurio)", pero presume que es más seguro (epistémicamente más importante) elemento**Q**(mercurio) que propiedadΩ(mercurio), podría entonces reactualizar sus creencias realizando la siguiente contracción: $E_{KB}\,\tilde{}\,\Phi$, donde Φ = elemento**Q**(mercurio) $\wedge$ propiedadΩ(mercurio). La BC K_B permanece inalterada en el nuevo estado epistémico y el conjunto de excepciones incluye además la nueva excepción: {metal(acero), propiedadΩ(mercurio)}. Esto es, $E_{KB}\,\tilde{}\,\Phi$ = < K_B , $K_{B,del}$ = {metal(acero), propiedadΩ(mercurio)} >. Ahora, el científico puede deducir de su conocimiento todo lo que infería antes, excepto el hecho propiedadΩ(mercurio). Por ejemplo, elemento**Q**(mercurio) y metal**Q**(mercurio).

Como desventaja aparente del nuevo enfoque podemos decir que no es absolutamente transparente. No toda fórmula derivable por *SLD-resolución* de una BC es una creencia válida del agente en su estado epistémico, ya que está condicionada respecto del conjunto de creencias eliminadas previamente por el agente. Sin embargo, el sistema planteado refleja una concepción más realista del mantenimiento de creencias de un agente luego de una actualización, permitiendo conservar creencias generales del agente (cuantificadas universalmente) que resultan ser válidas, salvo excepciones específicas (incluidas en $K_{B,del}$ para una BC K_B). Es importante remarcar que el uso de "excepciones" en las pruebas no incorpora complejidad ni restricciones adicionales a la decidibilidad del sistema de deducción (SLD-resolución), pues podemos pensar e implementar a las *pruebas con excepciones* como un "filtrado" de las obtenidas mediante la generación de los árboles-SLD.

4.4 Análisis de Composicionalidad de las Operaciones de Cambio: Propiedades

Una característica deseable de un modelo de actualización del conocimiento es la de permitirnos realizar cambios repetidos de creencias, tal como $(K^{-}\phi)^{-}\psi$ o $(K^{-}\psi)^{-}\phi$ y, realizar comparaciones entre dichos cambios y, $K^{-}\psi\wedge\phi$ o $K^{-}\psi\vee\phi$ (por ejemplo)[12]. AGM no satisface este requerimiento, sin embargo los sistemas presentados de cambios para BC, con respecto al

[12] K representa a un estado epistémico. En el contexto de AGM, K es una teoría; en representaciones finitas, una BC.

fragmento Horn, nos permiten iterar operaciones de cambio, aunque comparar $(K^{-}\phi)^{-}\psi$ y $(K^{-}\psi)^{-}\phi$ no resulta satisfactorio en todos los modelos propuestos. No obstante, el modelo con "excepciones" se adapta más al requerimiento en análisis, ya que tiende a no eliminar creencias y a incluir restricciones (excepciones), definiendo un modelo de contracción "prezoso". En particular observemos que aunque en general $(K^{\sim}\phi)^{\sim}\psi \neq (K^{\sim}\psi)^{\sim}\phi$, una simple modificación puede ser hecha a la definición de la función de contracción para obtener la igualdad en la comparación anterior:

Si $\mathbf{Demo}_{\mathbf{Ekb},\Phi} = \emptyset$ $(\Phi = A_1\wedge\ldots\wedge A_n)$ **:** $\mathbf{E_{KB}}^{\sim}\,\mathbf{(A_1\wedge\ldots\wedge A_n) = < K_B\ ,\ K_{B,del}} \cup \mathbf{\{min_{\leq}\{A_1,\ldots,A_n\}\} >}$

"*la sentencia $A_1\wedge\ldots\wedge A_n$ no es derivable desde el estado de creencias E_{KB}*"

Con esta modificación y asumiendo Φ_i una sentencia de la forma $A_1\wedge\ldots\wedge A_n$ $(n\geq1)$, $(E_{KB}{}^{\sim}\,\Phi_1)^{\sim}\,\Phi_2 = (E_{KB}{}^{\sim}\,\Phi_2)^{\sim}\,\Phi_1$ y, en general: $(\ldots(E_{KB}{}^{\sim}\,\Phi_1)\ldots)^{\sim}\,\Phi_m = (\ldots(E_{KB}{}^{\sim}\,\Phi_{1'})\ldots)^{\sim}\,\Phi_{m'}$, con $[\Phi_1, \ldots, \Phi_m]$ una permutación de $[\Phi_{1'}, \ldots, \Phi_{m'}]$ y $m\geq1$. Es decir, podemos hablar de contracciones por conjuntos de creencias sin fijar un orden específico de secuencialización entre los cambios. Esta modificación, si bien no conserva estrictamente el postulado para bases correspondiente a $(K^{-}3)$ (si $\Phi \notin Cn(E_{KB})$, entonces $E_{KB} = E_{KB}{}^{\sim}\Phi$), retiene la propiedad esencial que él enuncia, ya que las consecuencias lógicas derivables del estado epistémico, antes y después del cambio, coinciden: si $\Phi \notin Cn(E_{KB})$, entonces $Cn(E_{KB}) = Cn(E_{KB}{}^{\sim}\Phi)$. Luego, asumimos este pseudo-postulado en reemplazo de $K^{-}3$.

Asimismo, podríamos realizar contracciones simultáneas por varios hechos. Sea $E_{KB} = < K_B,\ K_{B,del} >$ la componente explícita del estado de creencias de un agente, *$E = \{ E_{KB}$ | E_{KB} representa un estado de creencias\}* el conjunto de todos los estados epistémicos explícitos[13] y *$F = \{\{\Phi_1, \ldots, \Phi_m\}$ | $\Phi_i = A_1\wedge\ldots\wedge A_n$, A_j es un átomo básico, $1\leq j\leq n$, y $1\leq i\leq m\}$* el dominio de los conjuntos de creencias que provocan los cambios. Definimos la función de contracción simultánea $(\approx)$ de E por F en E como una extensión de la función $(\sim)$, de la siguiente manera:

$$\mathbf{E_{KB}}^{\approx}\{\Phi_1, \ldots, \Phi_m\} = < \bigcap\{K_{Bi} \mid E_{KB}{}^{\sim}\Phi_i = < K_{Bi}\ ,\ K_{Bi,del} >\}\ ,\ \bigcup\{K_{Bi,del} \mid E_{KB}{}^{\sim}\Phi_i = < K_{Bi}\ ,\ K_{Bi,del} >\} >$$

Es decir, la BC explícita se compone de todas las creencias *comunes* que se conservan luego de las contracciones individuales y del conjunto de excepciones ampliado con la *suma* de las correspondientes a los cambios individuales. Luego, $E_{KB}{}^{\approx}\{\Phi_1, \ldots, \Phi_m\} = (\ldots(E_{KB}{}^{\sim}\,\Phi_1)\ldots)^{\sim}\,\Phi_m = (\ldots(E_{KB}{}^{\sim}\,\Phi_{1'})\ldots)^{\sim}\,\Phi_{m'}$, con $[\Phi_{1'}, \ldots, \Phi_{m'}]$ una permutación de $[\Phi_1, \ldots, \Phi_m]$ y $m\geq1$. En función de esto, podemos definir la contracción por una disyunción de átomos básicos, como: $\mathbf{E_{KB}}^{-}\mathbf{\{A_1\vee\ldots\vee A_n\} = E_{KB}}^{\approx}\mathbf{\{A_1, \ldots, A_n\}}$, asumiendo a (–) como una extensión de $(\sim)$ para permitir contracciones tanto por conjunciones como por disyunciones de átomos ground. Finalmente, un resultado importante que vincula la contracción con la expansión, en el último modelo en análisis, es:

$$\textbf{Si } \mathbf{min_{\leq}\{A_1,\ldots,A_n\}} \notin \mathbf{\{B_1,\ldots,B_m\}}\textbf{:}\ \ \mathbf{(E_{KB}{}^{\sim}(A_1\wedge\ldots\wedge A_n))^{\oplus}(B_1\wedge\ldots\wedge B_m) = (E_{KB}{}^{\oplus}(B_1\wedge\ldots\wedge B_m))^{\sim}(A_1\wedge\ldots\wedge A_n)}$$

Es decir, si consideramos la modificación realizada a $(\sim)$ respecto al caso en que la creencia a contraer no sea consecuencia lógica del conocimiento explícito, podemos permutar el orden en que se realiza una contracción y una expansión, siempre que la sentencia a abandonar $(min_{\leq}\{A_1,\ldots,A_n\})$ a causa de la contracción por $A_1\wedge\ldots\wedge A_n$, no sea ninguno de los hechos a incorporar $(B_1,\ldots,B_m)$.

4.5 Implementación: Consideraciones Básicas

Una regla de búsqueda es una estrategia para árboles-SLD con el fin de encontrar ramas exitosas. En la especificación de un *procedimiento de refutación SLD*, necesitamos considerar una regla de computación que seleccione átomos en las metas definidas y una estrategia de búsqueda [LLO87]. Si bien la elección de una determinada regla de computación es irrelevante, la estrategia de búsqueda en un árbol SLD juega un papel importante. Por ejemplo, si adoptamos una técnica de búsqueda *primero en profundidad* 'depth first search', obtenemos un algoritmo simple y eficiente pero no garantizamos encontrar todas las ramas exitosas, ya que esta estrategia no evita, en general, ramas infinitas (obteniendo una máquina de inferencia incompleta). Por otro lado, una estrategia de búsqueda *primero a lo ancho* 'breadth first search' nos asegura que cada rama exitosa será eventualmente encontrada, aunque al precio de una

---

[13] Recordar que el estado de creencias está compuesto por creencias explícitas y por aquellas derivadas de la BC.

implementación ineficiente. Luego, una metodología por niveles que captura lo mejor de las dos estrategias referidas es la técnica llamada *profundización iterativa* 'iterative deepening'. Este método intenta tener lo mejor de ambos mundos, combinando la economía de espacio de 'depth first search' con la exhaustividad (imparcialidad) de 'breadth first search', garantizando encontrar todas las ramas exitosas en un árbol-SLD.

Un detalle a tener en cuenta es que aún usando un estrategia de búsqueda por niveles, el algoritmo que implemente el recorrido de un árbol con al menos una rama infinita y sin ramas exitosas, entrará en un *loop* infinito. Una idea saludable sería considerar un procedimiento de detección de loops infinitos que evite la no terminación de los algoritmos que operen sobre árboles-SLD. La construcción de las secuencias de cláusulas usadas en las ramas de un árbol-SLD puede implementarse utilizando un sistema ATMS[14] para el lenguaje Horn analizado, teniendo en cuenta las consideraciones realizadas anteriormente.

Luego, podríamos pensar en la construcción de metaintérpretes Prolog [STSH89] que permitan implementar los distintos sistemas de cambios de creencias formulados. El lenguaje Prolog resulta adecuado teniendo en cuenta la naturaleza del problema a resolver (cambio de creencias) y el lenguaje de representación de conocimiento elegido. En el caso del sistema de cambio con "excepciones", podríamos plantear un metaintérprete Prolog que encuentre todas las pruebas (vía SLD) y descarte después las inválidas, teniendo en cuenta el conjunto de excepciones perteneciente al estado epistémico del agente en un instante dado.

5. El Cálculo de Predicados como lenguaje de Representación

El objetivo de esta sección es aplicar y extender el análisis previo realizado para Horn al Cálculo de Predicados sin igualdad ($\mathbf{P}$), por ser éste un lenguaje de representación de conocimiento más expresivo y ampliamente usado. Una BC será representada por un conjunto de fórmulas de $\mathbf{P}$. De esta manera el estado epistémico de un agente estará constituído por todos los teoremas que pueden derivarse de las creencias explícitas en la BC. Teniendo en cuenta que cada fórmula bien formada de $\mathbf{P}$ es equivalente a una fórmula bien formada en forma normal conjuntiva reducida (*fncr*) [DAV89], adoptaremos este contexto de representación para las sentencias, con el objetivo de utilizar el principio de resolución de literales complementarios como mecanismo de prueba [ROB65].

<u>*Definición*</u>: Una fórmula bien formado de $\mathbf{P}$ está en ***forma normal conjuntiva*** (forma clausal) si es una "sentencia" descripta por la siguiente gramática:

literal ::= átomo | "¬" átomo[15]
cláusula ::= "∅" | "{" literal "}" | "{" literal "}" ∪ cláusula
sentencia ::= "{" cláusula "}" | "{" cláusula "}" ∪ sentencia

Observemos que estamos interpretando a una cláusula como una disyunción de los elementos del conjunto que la forman y a una sentencia como una conjunción de las cláusulas en el conjunto que la define. A pesar de no haber cuantificadores supondremos que cada sentencia es cerrada, al estar todas sus variables cuantificadas universalmente. La interpretación dada a una cláusula permite caracterizar, en realidad, a sentencias en *fncr* (∅ se interpreta como una contradicción: ⊥). Luego, Una BC K_B estará constituida por un conjunto de cláusulas (conjunción de disyunciones de literales), esto es, por la unión de sentencias en *fncr*.

<u>*Definición*</u>: Una ***derivación por resolución*** de una cláusula A desde un conjunto (BC) K_B es una secuencia de cláusulas terminando en A, en donde cada ítem de la secuencia es, o bien un miembro de K_B, ó el resultado de la aplicación del principio de resolución a ítems previos en la secuencia. El principio de resolución de Primer-Orden para cláusulas puede ser descripto como:

$$\frac{\begin{array}{c}\{L_1, ..., R, ..., L_n\} \\ \{M_1, ..., \neg R', ..., M_k\}\end{array}}{\{L_1, ..., L_n, M_1, ..., M_k\}\,\sigma\mu}$$

Donde $R\sigma = R'\sigma$ para alguna substitución σ, y μ es un renombre de variables.

---

[14] ATMS es una abreviatura de Assumption Based Truth Maintenance Systems.
[15] Un átomo se define como en la subsección 4.1.1.

Una sentencia A (meta) es *demostrable* a partir de un conjunto (BC) K_B por resolución, sssi existe una derivación por resolución de la cláusula vacía ($\emptyset$) desde el conjunto $K_B \cup \{\neg A\}$ en *fncr*. Es importante destacar que *resolución* resulta sana (correcta) y completa.

A continuación describimos la extensión de las operaciones de cambio presentadas a lo largo de la subsección 4.2, al nuevo lenguaje de representación de conocimiento. Las sentencias que desencadenan los cambios serán literales y conjunciones de éstos, sin variables (ground).

Expansión. Dada una BC K_B consistente y una conjunción de literales (sin variables), se define como: $\mathbf{K_B^+(L_1 \wedge ... \wedge L_n) = K_B \cup \{\{L_1\},...,\{L_n\}\}\ (n \geq 1).}$

Contracción. Teniendo en cuenta resolución de Primer-Orden, podemos considerar la construcción de las pruebas minimales para una meta A a partir de una BC K_B siguiendo una metodología análoga a la presentada en la subsección 4.2.3. Definimos a la contracción (–) como una operación que dada una BC K_B consistente y una conjunción de literales (sin variables) retorna una nueva BC:

$$\mathbf{K_B^- \Phi = \Big(K_B - \bigcup_{Si \,\in\, CLs(K_B \perp\!\!\!\perp \Phi)} Del(K_B,\Phi)^{Si}\Big) \cup \Big\{\{M_1,...,M_k,\neg L_1,...,\neg L_n\} \mid \{M_1,...,M_k\} \in \bigcup_{Si \,\in\, CLs(K_B \perp\!\!\!\perp \Phi)} Del(K_B,\Phi)^{Si}\Big\}}$$

$\Phi = L_1 \wedge ... \wedge L_n$ (conjunción de literales sin variables) ; $\mathbf{K_B \perp\!\!\!\perp \Phi}$ es el conjunto de las secuencias de cláusulas instanciadas que constituyen una prueba de Φ a partir de K_B (una derivación por resolución de $\emptyset$ desde el conjunto: $K_B \cup \{\neg \Phi\}$ en *fncr*); $\mathbf{CLs(K_B \perp\!\!\!\perp \Phi)}$ es la colección de los conjuntos de cláusulas de la BC K_B usadas en cada prueba de Φ (pertenecientes a $K_B \perp\!\!\!\perp \Phi$). La función **Del** determina las cláusulas de K_B ha ser suprimidas (de acuerdo a algún criterio determinado) para garantizar el éxito de la contracción.

Revisión. A diferencia que en el sistema *programas definidos/SLD-resolución*, la revisión no coincide con la expansión. En el contexto del nuevo lenguaje podemos explicitar y derivar información tanto positiva como negativa. La idea es definir a la revisión como una secuencialización de una contracción y una expansión, usando la *identidad de Levi* presentada en 2.3.4: $K^* \phi = (K^- \neg \phi)^+ \phi$. Para ello necesitamos extender la operación de contracción, para que contemple disyunciones de liteales. La razón es que ϕ es una conjunción de literales y necesitamos contraer por $\neg \phi$. $\mathbf{K_B^-\ (L_1 \vee ... \vee L_n) = (...(K_B^-\ L_1)...)^- L_n}$, si $(L_1 \vee ... \vee L_n) \notin Cn(\emptyset)$ y, $\mathbf{K_B^-\ (L_1 \vee ... \vee L_n) = K_B}$, en caso contrario. Asimismo, la expansión y la revisión pueden extenderse directamente a disyunciones: $\mathbf{K_B^+(L_1 \vee ... \vee L_n) = K_B \cup \{\{L_1,...,L_n\}\}}$, y en el caso de la revisión queda reflejada por la identidad de Levi.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo presentamos un análisis de la aplicación del modelo AGM de cambio de creencias a bases de conocimiento, a partir de la utilización de cláusulas Horn como lenguaje de representación (inicial) y resolución como mecanismo de prueba. Distintas funciones de expansión y contracción fueron expuestas, y sistemas alternativos se consideraron con el objetivo de satisfacer, por un lado, la claridad y declarativitdad de una base actualizada, y por el otro, garantizar la mínima pérdida de información en un cambio epistémico y la composicionalidad de las operaciones de cambio. Debido a los problemas suscitados en la satisfacción de ciertos postulados AGM en el contexto BC, nuevos postulados fueron propuestos en relación a éstos para "medir la bondad" de las operaciones de cambio formuladas.

Los modelos de cambio con "Sensitividad a la Historia" y con "Excepciones" nos permitieron, además, extender la representación clásica de estados epistémicos en función a bases de conocimiento. Asimismo, el análisis realizado sugiere que estos modelos podrían generalizarse y aplicarse a otros lenguajes de representación de conocimiento más expresivos. En particular, el segundo modelo que se caracteriza por satisfacer un criterio –a nuestro entender– "más realista" del concepto de máxima conservación del conocimiento luego de un cambio, y por verificar una serie de propiedades respecto de la composicionalidad de las operaciones de cambio.

El trabajo futuro consiste en la extensión de los modelos presentados en la sección 4.3 para ser aplicados al nuevo lenguaje, menos restringido que Horn. En ambos modelos la revisión puede definirse a través de la identidad de Levi. Las propiedades que verifican los operadores en el contexto de ₱ se siguen del análisis realizado en el contexto Horn. Por último, debido a la semi-decidibilidad de la *resolución de Primer-Orden*, deben tenerse en cuenta consideraciones computacionales, debido a que el tiempo y el espacio requerido para las demostraciones en el nuevo lenguaje se incrementan considerablemente.

Referencias

[AGM85] C. Alchourrón, P. Gärdenfors and D. Makinson: *On The Logic of Theory Change: Partial Meet Contraction and Revision Functions*. Journal of Symbolic Logic, 50:510-530, 1985.

[ALC80] C. Alchourrón and D. Makinson: *Hierarchies of Regulations and Their Logic*, New Studies in Deontic Logic, R. Hilpinen, ed. Dordrecht: Reidel, 123-148. 1980.

[ALC82] C. Alchourrón and D. Makinson: *On The Logic of Theory Change: Contraction Function and their Associated Revision Functions*. Theoria 48:14-37, 1982.

[ALC85] C. Alchourrón and D. Makinson: *On the Logic of Theory Change: Safe Contraction*, Studia Logica 44:405-422.

[APT82] K. Apt y M. van Emden: *Contributions to the Theory of Logic Programming*, J. ACM 29,3. 1982, 841-862.

[DAV89] R. Davis: *Truth, Deduction and Computation: Logic and Semantics for Computer Science*. Computer Science Press, New York, United States of America, 1989.

[FAL95a] M. Falappa y G. Simari: *Propiedades del Operador de Revisión mediante Argumentos*, CACIC'95, 1995.

[FAL95b] M. A. Falappa y G. R. Simari: *Revisión de Bases de Conocimiento mediante Argumentos*, Congreso Internacional de Cibernética, Matemática y Física, CIMAF'95; La Habana, Cuba, Enero de 1995.

[FER95] E. L. Fermé: *Teoría de Cambio de Creencias. Relación entre las funciones de contracción G_AGM y Kernel*, Segundo Workshop sobre Aspectos Teóricos de la Inteligencia Artificial. Bahía Blanca, 1995.

[FUH91] A. Fuhrman: *Theory Contraction throught Base Contraction*, Journal of Philosophical Logic 20:175-203, 1991.

[GÄR88a] P. Gärdenfors: *Knowledge in Flux: Modeling the Dynamics of Epistemic States.* Cambridge, MA: The MIT Press, Bradford Books, 1988

[GÄR88b] P. Gärdenfors and D. Makinson: *Revision of Knowledge System Using Epistemic Entrechment,* Second Conference on Theorical Aspect of Reasoning About Knowledge: 83-95, 1988.

[GÄR92] P. Gärdenfors: *Belief Revision: An Introduction,* Belief Revision. Cambridge University Press 1992.

[HAN89] S. O. Hansson: *New Operators for Theory Change,* Theoria 55:114-132

[HAN92] S. O. Hansson: *A Dyadic Representation of Belief,* pp. 89-121 in Gärdenfors (ed.), Belief Revision, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

[HAN93a] Sven Ove Hansson: *A Textbook of Belief Dynamics: Theory Change and Database Updating.* First Draft, Upsala University, Sweden, 1993.

[HAN93b] S. O. Hansson: *Reversing the Levi Identity,* Journal of Philosophical Logic, 22:637-669, 1993.

[HAN94] S. O. Hansson: *Kernel Contraction,* Journal of Symbolic Logic, 59:845-859, 1994.

[HAR77] W. L. Harper: *Rational Conceptual Change*. PSA 1976, 2:462-494, 1977.

[KOW74] R. A. Kowalski: *Predicate Logic as a Programming Language*. Information Procesing 74, Stockholm, North Holland, 1974, 569-574.

[LEV77] I. Levi: *Direct Inference,* The Journal of Philosophy, 74:5-29, 1977.

[LEV80] Isaac Levi: *The Enterprise of Knowledge*. MIT Press, Cambridge, 1980.

[LLO87] J. W. Lloyd: *Fundations of Logic Programming*. Springer-Verlag B. Heidelberg N. York, 1987.

[MAK87] D. Makinson: *On the Status of the Postulate of Recovery in the Logic of Theory Change*, Journal of Philosophical Logic, 16:383-394., 1987.

[ROD92] O. Rodrigues and M. Benevides: *Belief Revision in Pseudo-Definite Sets*, SBIA'92. 1992.

[ROB65] J. Robinson: *A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle*. J. ACM 12, 1. 1965, 23-41.

[STSH86] L. Sterling and E. Shapiro: *The Art of Prolog.* The MIT Press, Cambridge, London, England. 1986.